第47卷 第12期
2024年12月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 12
Dec. 2024

基于遥感的库尔勒地区生态环境质量评价及成因分析

李世娇[1]， 张珂珂[1]， 谢宝妮[1,2]， 王世文[1,3]， 李治广[1,3]

（1. 河北地质大学城市地质与工程学院，河北 石家庄 050031； 2. 河北地质大学-河北省农业干旱遥感监测国际联合研究中心，河北 石家庄 050031； 3. 河北地质大学-河北省地下人工环境智慧开发与管控技术创新中心，河北 石家庄 050031）

摘 要： 库尔勒地区生态环境敏感脆弱，准确认知该地区的生态环境质量是当地政府科学制定生态环境保护和修复政策的基础。基于遥感生态指数思想，结合研究区生态系统特征，耦合植被覆盖、土壤湿度、地表温度、地表干度、沙漠化程度、盐渍化程度、蒸散发7个生态要素，采用主成分分析法构建了改进型遥感生态指数（Modified remote sensing based ecology index，MRSEI），对1994—2021年库尔勒地区生态环境质量进行评价和成因分析。结果表明：（1）MRSEI可以反映库尔勒地区的生态环境质量。（2）1994—2021年库尔勒地区MRSEI变化范围为0.253~0.346，总体为上升趋势，生态环境质量整体改善；生态环境质量等级以“差”和“较差”为主，二者面积占比为70.96%，整体生态环境质量呈现为“西部相对较差、东部相对较好”。（3）近27 a来，库尔勒地区60.41%面积上生态环境质量基本不变，主要分布在丘陵西部和台地；16.47%的面积上生态环境质量退化，主要分布在平原北部、部分中起伏山地和小起伏山地；23.12%的面积上生态环境质量改善，主要分布在平原和丘陵的东部。（4）气候、社会经济与库尔勒地区生态环境质量关系密切，其中蒸发量对生态环境质量的影响高于其他气候要素，年末总人口是影响该地区生态环境质量的第一社会经济要素。

关 键 词： 遥感；生态环境质量评价；主成分分析；库尔勒地区

文章编号： 1000－6060(2024)12－2064－11(2064～2074)

生态环境问题是人类生存和经济社会可持续发展面临的重大挑战，引起世界各国政府和学术界高度关注，如土地荒漠化、盐渍化、湖泊干涸、生物多样性降低等[1]。2005年习近平提出“绿水青山就是金山银山”，这一发展理念深刻阐释了生态环境对人类生存和社会发展的重要意义[2]。我国在“十四五”规划和政府工作报告中多次强调要坚定不移地走生态优先的绿色发展之路，倡导绿色低碳的生产生活方式，积极推进生态保护和修复，先后开展了荒漠化综合防治、三北防护林、退耕还林还草等一系列生态建设工程项目，遏制了生态环境的进一步恶化[3]。然而，自然生态系统适应能力有限，加之部分地区生态环境极其脆弱，我国生态环境保护和修复工作形势依然严峻[4]。

科学开展生态环境质量评价是生态环境保护和修复工作的关键和前提。前国家环境保护总局在相关技术规范中提出生态环境状况指数（Ecological index，EI）这一方法，该方法基于遥感技术集成了生物丰度、植被覆盖、水网密度、土地退化和环境质量5个方面的信息，主要用于我国县级以上行政区生态环境质量年度综合评价[5]。在EI的实际应用中，各评价指数的权重受评价人个体经验影响较大，且难以实现评价结果的可视化[6]。针对这一问题，徐涵秋[7]提出了一种基于遥感影像的遥感生态指数（Remote sensing ecological index，RSEI），该指数使用主成分分析集成绿度、干度、湿度和热度信息，

收稿日期： 2024-04-21； **修订日期：** 2024-05-13
基金项目： 国家自然科学基金项目（42001380）资助
作者简介： 李世娇（2000-），女，硕士研究生，主要从事地质灾害及防治等方面的研究. E-mail: lsj_149@126.com
通讯作者： 李治广（1978-），男，博士，副教授，主要从事区域生态环境等方面的研究. E-mail: lizhg1978@126.com

实现了区域生态环境质量评价结果的空间表达。近年来，基于RSEI思想，根据目标区域的地域特点和应用需求，一些学者引入了更多的生态要素指标，对RSEI进行了不同形式的改进。如Dong等[8]在RSEI基础上引入景观多样性指数，对黄河宁夏段绿洲生态环境进行了评价。李倩琳等[9]通过增加盐度指标来改进RSEI，评价了柴达木盆地生态环境质量，评价结果较好地反映了该区域生态环境质量时空变化。

库尔勒地区是古丝绸之路中道的咽喉之地和西域文化的重要发源地，是当前"一带一路"倡议的物流中枢[10]，生态环境极其脆弱。学者们分别从城市化[11]、植被覆盖[12]、水资源压力[13]、土地利用[14]等视角开展了库尔勒地区生态环境的相关研究，结果显示该区域生态环境与植被覆盖、水资源利用、土地沙化和盐渍化等关系密切。因此，充分考虑各种生态要素，综合评价库尔勒地区生态环境质量，是精准开展该地区植被修复、水资源利用、防风固沙等生态环境保护和修复工作的关键。目前，反映该地区生态环境质量的多指标定量评估成果仍比较匮乏。本文利用遥感影像(1994—2021年)，构建改进型遥感生态指数(Modified remote sensing based ecology index，MRSEI)，对库尔勒地区生态环境质量开展多指标定量评价研究，旨在揭示该地区生态环境质量时空演变特征。

1 研究区概况

库尔勒市隶属于新疆维吾尔自治区巴音郭楞蒙古自治州，地理位置介于85°14′10″~86°34′21″E，41°15′06″~42°16′46″N之间，位于塔里木盆地东北边缘[15]，地势北高南低，总面积为7373.530 km²。库尔勒地区气候类型属暖温带大陆性荒漠气候，年平均气温约11.4 ℃，年平均降水量约61 mm[13]，光照、热量资源较为丰富，昼夜温差大。区内水资源匮乏，水系以塔里木河、孔雀河为主。植被稀疏，以灌木、草地为主。库尔勒地区地貌形态共有丘陵、平原、台地、小起伏山地和中起伏山地5种类型(图1)。

2 数据与方法

2.1 数据来源及预处理

遥感数据来自美国地质调查局，采用1994、2000、2006、2011、2016年和2021年每年7—9月的

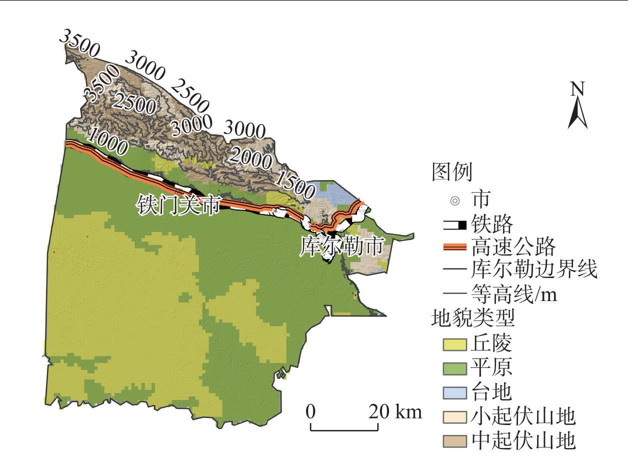


图1 库尔勒地区地貌类型空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of geomorphological types in Korla region

多期遥感数据(表1)，其中1994、2006、2011年选取Landsat 5卫星影像，2000年选取Landsat 7卫星影像，2016、2021年选取Landsat 8卫星影像，空间分辨率均为30 m。对获取的原始影像进行辐射定标、大气校正、影像镶嵌和裁剪等预处理。

2.2 研究方法

2.2.1 生态因子计算方法 本研究基于ENVI5.3平台，利用遥感影像集成植被覆盖、土壤湿度、地表温度、地表干度、沙漠化程度、盐渍化程度、蒸散发7个生态要素信息，所选用的指标及计算公式如下。

(1) 植被覆盖

选取概括差值植被指数(Generalized difference vegetation index，GDVI)作为植被覆盖指标，在低植被覆盖区，GDVI可以较好的反映荒漠植被的覆盖情况[16]。其计算公式为：

$$\mathrm{GDVI} = \left(\rho_{\mathrm{NIR}}^{2} - \rho_{\mathrm{Red}}^{2}\right) / \left(\rho_{\mathrm{NIR}}^{2} + \rho_{\mathrm{Red}}^{2}\right) \tag{1}$$

式中：ρ_{NIR}为近红波段的反射率；ρ_{Red}为红波段的反射率。

(2) 土壤湿度

土壤湿度由缨帽变换(K-T变换)得到的湿度分量(Wet)来表征，它可以很好地揭示土壤和植被的湿度[17]。Landsat 5、Landsat 7和Landsat 8影像湿度分量的计算公式[18]见式(2)~(4)：

$$\mathrm{Wet}_5 = 0.0315\rho_{\mathrm{Blue}} + 0.2021\rho_{\mathrm{Green}} + 0.3102\rho_{\mathrm{Red}} + 0.1594\rho_{\mathrm{NIR}} - 0.6806\rho_{\mathrm{SWIR1}} - 0.6109\rho_{\mathrm{SWIR2}} \tag{2}$$

$$\mathrm{Wet}_7 = 0.2626\rho_{\mathrm{Blue}} + 0.2141\rho_{\mathrm{Green}} + 0.0926\rho_{\mathrm{Red}} + 0.0656\rho_{\mathrm{NIR}} - 0.7629\rho_{\mathrm{SWIR1}} - 0.5388\rho_{\mathrm{SWIR2}} \tag{3}$$

$$\mathrm{Wet}_8 = 0.1511\rho_{\mathrm{Blue}} + 0.1972\rho_{\mathrm{Green}} + 0.3283\rho_{\mathrm{Red}} + 0.3407\rho_{\mathrm{NIR}} - 0.7117\rho_{\mathrm{SWIR1}} - 0.4559\rho_{\mathrm{SWIR2}} \tag{4}$$

表1 Landsat卫星数据信息

Tab. 1 Landsat satellite data information

卫星名称	条带号/行编号	影像时间(年-月-日)	卫星名称	条带号/行编号	影像时间(年-月-日)
Landsat 5	143/31	1994-08-24	Landsat 8	143/31	2016-09-21
Landsat 5	143/31	1994-09-09	Landsat 8	144/31	2016-07-10
Landsat 5	143/31	1994-09-25	Landsat 8	144/31	2016-07-26
Landsat 7	143/31	2000-07-31	Landsat 8	144/31	2016-09-12
Landsat 7	143/31	2000-09-17	Landsat 8	144/31	2016-09-28
Landsat 5	143/31	2006-07-24	Landsat 8	143/31	2021-07-01
Landsat 5	143/31	2006-09-10	Landsat 8	143/31	2021-08-02
Landsat 5	143/31	2006-09-26	Landsat 8	143/31	2021-08-18
Landsat 5	143/31	2011-07-06	Landsat 8	143/31	2021-09-03
Landsat 5	143/31	2011-08-07	Landsat 8	143/31	2021-09-19
Landsat 5	143/31	2011-08-23	Landsat 8	144/31	2021-07-24
Landsat 5	143/31	2011-09-24	Landsat 8	144/31	2021-08-09
Landsat 8	143/31	2016-08-04	Landsat 8	144/31	2021-09-26
Landsat 8	143/31	2016-09-05			

注:气象数据下载于中国气象数据网,选取库尔勒市站点;社会经济数据来源于《新疆统计年鉴》《中国县域统计年鉴》;地貌数据和土地利用数据下载于中国科学院资源环境科学数据中心。

式中:Wet_5、Wet_7、Wet_8分别为Landsat 5、Landsat 7、Landsat 8影像的湿度分量;ρ_{Blue}、ρ_{Green}、ρ_{SWIR1}、ρ_{SWIR2}分别为各自影像蓝、绿、短波红外1、短波红外2波段的反射率。

(3) 地表温度

地表温度(Land surface temperature,LST)通过Landsat用户手册模型[19]和Chander等[20]提供的参数来反演,计算公式见式(5)~(8):

$$LST = T_\lambda \Big/ \left[1 + \left(\lambda T_\lambda / \rho\right)\ln\varepsilon\right] \tag{5}$$

$$T_\lambda = K_2 \Big/ \ln\left(K_1 / L_\lambda + 1\right) \tag{6}$$

$$L_\lambda = gain \times DN + bias \tag{7}$$

$$\varepsilon = 0.004F_v + 0.986 \tag{8}$$

式中:T_λ为传感器处亮温值;λ为影像热红外波段的中心波长;$\rho = 1.438 \times 10^{-2} m \cdot K$;$\varepsilon$为地表比反射率;$K_2$、$K_1$为影像原数据获得的参数;$L_\lambda$为影像热红外波段的辐射亮度值;gain和bias分别为热红外波段的增益值和偏置值;DN为像元灰度值;F_v为植被覆盖度。

(4) 地表干度

地表干度由归一化建筑和裸土指数(Normalized differential built and soil index,NDBSI)来表征[21-22],计算公式见式(9)~(11):

$$NDBSI = (IBI + SI)/2 \tag{9}$$

$$IBI = \left\{ 2\rho_{SWIR1} \Big/ \left(\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}\right) - \left[\begin{array}{l} \rho_{NIR} \Big/ \left(\rho_{NIR} + \rho_{Red}\right) + \\ \rho_{Green} \Big/ \left(\rho_{Green} + \rho_{SWIR1}\right) \end{array} \right] \right\} \Bigg/ \left\{ 2\rho_{SWIR1} \Big/ \left(\rho_{SWIR1} + \rho_{NIR}\right) + \left[\begin{array}{l} \rho_{NIR} \Big/ \left(\rho_{NIR} + \rho_{Red}\right) + \\ \rho_{Green} \Big/ \left(\rho_{Green} + \rho_{SWIR1}\right) \end{array} \right] \right\} \tag{10}$$

$$SI = \left[\left(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}\right) - \left(\rho_{Blue} + \rho_{NIR}\right)\right] \Big/ \left[\left(\rho_{SWIR1} + \rho_{Red}\right) + \left(\rho_{Blue} + \rho_{NIR}\right)\right] \tag{11}$$

式中:IBI为建筑指数;SI为裸土指数。

(5) 沙漠化程度

选取沙漠化指数[23](Desertification index,DI)作为沙漠化程度指标,DI可以有效提取干旱区土壤沙漠化信息[24-25],计算公式见式(12)~(17):

$$DI = -DDI \tag{12}$$

$$DDI = -1/K_i \times NDVI_{标} - Albedo_{标} \tag{13}$$

$$NDVI_{标} = \left(NDVI - NDVI_{min}\right) \Big/ \left(NDVI_{max} - NDVI_{min}\right) \times 100\% \tag{14}$$

$$Albedo_{标} = \left(Albedo - Albedo_{min}\right) \Big/ \left(Albedo_{max} - Albedo_{min}\right) \times 100\% \tag{15}$$

$$NDVI = \left(\rho_{NIR} - \rho_{Red}\right) \Big/ \left(\rho_{NIR} + \rho_{Red}\right) \tag{16}$$

$$Albedo = 0.356\rho_{Blue} + 0.130\rho_{Red} + 0.373\rho_{NIR} + 0.085\rho_{SWIR1} + 0.072\rho_{SWIR2} - 0.0018 \tag{17}$$

式中:DDI为沙漠化遥感差值指数;K_i为Albedo-

NDVI特征方程的斜率；i为所选Landsat影像的年份；$NDVI_{标}$、$Albedo_{标}$分别为标准化后的NDVI和Albedo；$NDVI_{min}$、$NDVI_{max}$分别为NDVI的最小值和最大值；$Albedo_{min}$、$Albedo_{max}$分别为Albedo的最小值和最大值；NDVI为归一化差值植被指数；Albedo为地表反射率。

（6）盐渍化程度

选取土壤盐渍化指数（Modified salinity index，MSI）作为盐渍化程度指标[26]，MSI可以较准确的反映干旱区土壤盐渍化程度[27-28]，计算公式见式（18）~（22）：

$$MSI = \left[\left(MSAVI_{标} - MSAVI_{max}\right)^2 + SI_{标}^2\right]^{1/2} \quad (18)$$

$$MSAVI_{标} = \left(MSAVI - MSAVI_{min}\right) / \left(MSAVI_{max} - MSAVI_{min}\right) \times 100\% \quad (19)$$

$$SI_{标} = \left(SI - SI_{min}\right) / \left(SI_{max} - SI_{min}\right) \times 100\% \quad (20)$$

$$MSAVI = \left\{\left(2\rho_{NIR} + 1\right) - \left[\left(2\rho_{NIR} + 1\right)^2 - 8\left(\rho_{NIR} - \rho_{Red}\right)\right]^{1/2}\right\} / 2 \times 100\% \quad (21)$$

$$SI = \left(\rho_{Blue} \times \rho_{Red}\right)^{1/2} \quad (22)$$

式中：$MSAVI_{标}$为标准化后的MSAVI；$MSAVI_{max}$、$MSAVI_{min}$分别为MSAVI的最大值、最小值；$SI_{标}$为标准化后的SI；SI_{min}、SI_{max}分别为SI的最小值和最大值；MSAVI为修改型土壤调整植被指数；SI为盐分指数。

（7）蒸散发

蒸散发由潜在蒸散发（Potential evapotranspiration，PET）来表征，它是水分循环的重要组成部分[29]。PET基于国家地球系统科学数据中心提供的中国逐月潜在蒸散发数据集[30]处理得到。

2.2.2　*构建*MRSEI　通过主成分分析法耦合上述7个指标，构建MRSEI。主成分分析法经正交变换将一组相关变量变成另外一组不相关的主成分分量，去除冗余信息[31]，也能避免人为主观对权重的影响，使得MRSEI更具有客观性和科学性。

7个指标的数值相差较大，在进行主成分分析前对其进行归一化处理。主成分分析后得到第一主成分（PC1），采用PC1为改进型遥感生态指数的初始值（$MRSEI_0$）。GDVI对生态环境起正面影响，当GDVI的载荷为负值时，$MRSEI_0 = 1 - PC1$，当GDVI的载荷为正值时，$MRSEI_0 = PC1$。

为了便于比较，需对$MRSEI_0$进行归一化处理得到MRSEI，计算公式为：

$$MRSEI = \left(MRSEI_0 - MRSEI_{min}\right) / \left(MRSEI_{max} - MRSEI_{min}\right) \quad (23)$$

式中：$MRSEI_{min}$、$MRSEI_{max}$分别为$MRSEI_0$的最小值和最大值。

本文以0.2为间隔，将MRSEI值划分为[0.0, 0.2)、[0.2, 0.4)、[0.4, 0.6)、[0.6, 0.8)和[0.8, 1.0]，对应的生态环境质量等级分别为：差、较差、一般、良和优。

3　结果与分析

3.1　MRSEI的合理性分析

6期数据的PC1对MRSEI的贡献率在68.41%~77.08%之间（表2），集成了7个生态因子的大部分信息。采用PC1来表征生态环境质量，GDVI和Wet的载荷值都为正值，对生态环境质量起正向作用，LST、NDBSI、DI、MSI、PET的载荷值均为负值，对生态环境质量起负向作用，符合生态学认知。PC2、PC3、PC4、PC5、PC6和PC7中，7个生态因子载荷值的符号不稳定，无明显规律，难以解释生态现象。因此，基于PC1来构建MRSEI是合理的。

3.2　生态环境质量时空分布特征

MRSEI均值变化曲线及趋势（图2）表明：库尔勒地区27 a来生态环境质量整体较差，MRSEI均值的变化范围为0.253~0.346，平均约0.298。库尔勒地区生态环境质量在缓慢改善，MRSEI均值总体呈升高趋势，增长速率为0.0136（R^2=0.4929）。

统计不同生态环境质量等级面积及其占比，结果（图3、表3）表明，研究区生态环境质量等级以“差”和“较差”为主，二者面积和占比达到70.96%。其中，“差”等级的面积约4043.44 km^2（54.84%），“较差”等级的面积约1188.75 km^2（16.12%）。剩下3个等级的面积从大到小依次为：“优”“一般”“良”。

库尔勒地区1994—2021年生态环境质量等级存在显著空间差异（图4）。中起伏山地主要为“较差”和“一般”等级，少部分为“良”等级。小起伏山地主要为“较差”和“差”等级，少部分为“一般”和“良”等级。台地主要为“差”等级，少部分为“较差”等级。平原主要为“差”和“优”等级，部分为“较差”和“良”等级，少部分为“一般”等级。丘陵主要为“差”等级，部分为“较差”等级，以及少部分的“优”

表2 主成分分析结果

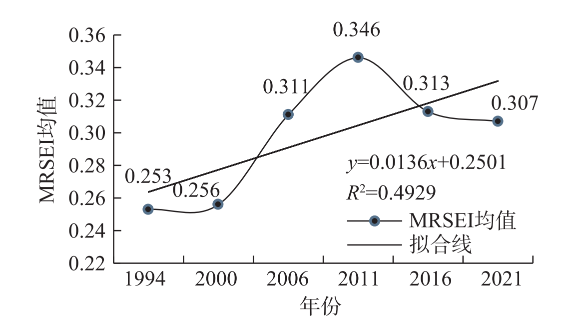
Tab. 2 Results of principle component analysis

年份	指标	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
1994	GDVI	0.686	0.270	0.502	0.218	−0.023	0.392	−0.051
	Wet	0.361	0.151	−0.839	−0.025	0.076	0.364	0.055
	LST	−0.241	0.181	−0.143	0.779	−0.528	0.009	−0.060
	NDBSI	−0.265	−0.300	0.049	0.458	0.688	0.392	−0.018
	DI	−0.277	−0.051	0.131	−0.200	−0.293	0.538	0.699
	MSI	−0.273	−0.050	0.039	−0.295	−0.248	0.520	−0.709
	PET	−0.344	0.881	0.046	−0.094	0.306	0.009	0.013
	特征值	0.152	0.043	0.018	0.004	0.003	0.001	0.000
	特征值贡献率/%	68.61	19.52	8.23	2.01	1.18	0.41	0.04
2000	GDVI	0.726	0.349	−0.403	−0.040	0.171	0.396	0.022
	Wet	0.283	0.056	0.861	−0.254	0.267	0.159	0.119
	LST	−0.338	0.305	−0.186	−0.867	0.059	0.052	−0.042
	NDBSI	−0.217	−0.257	−0.193	0.092	0.903	0.038	0.154
	DI	−0.254	−0.074	−0.026	0.061	−0.243	0.575	0.732
	MSI	−0.247	−0.120	0.084	0.108	−0.005	0.694	−0.651
	PET	−0.324	0.834	0.129	0.400	0.145	−0.032	0.016
	特征值	0.158	0.049	0.016	0.005	0.002	0.001	0.000
	特征值贡献率/%	68.41	21.32	6.75	2.04	1.00	0.36	0.12
2006	GDVI	0.670	0.166	−0.479	−0.073	0.162	−0.509	0.062
	Wet	0.346	−0.023	0.830	−0.223	0.240	−0.199	0.211
	LST	−0.276	0.303	−0.134	−0.901	0.038	0.005	0.023
	NDBSI	−0.393	−0.273	−0.173	0.095	0.743	−0.172	0.388
	DI	−0.341	−0.068	0.145	0.040	−0.019	−0.695	−0.611
	MSI	−0.248	0.059	0.018	0.084	−0.558	−0.435	0.653
	PET	−0.151	0.893	0.113	0.340	0.226	0.010	0.015
	特征值	0.216	0.058	0.015	0.005	0.003	0.000	0.000
	特征值贡献率/%	72.78	19.43	4.89	1.57	1.11	0.13	0.09
2011	GDVI	0.701	0.136	−0.425	−0.108	−0.349	−0.412	0.077
	Wet	0.328	0.028	0.891	−0.084	−0.283	−0.076	0.072
	LST	−0.313	0.369	−0.034	−0.855	−0.182	0.001	−0.007
	NDBSI	−0.342	−0.250	−0.114	0.204	−0.858	0.145	0.093
	DI	−0.250	−0.026	0.033	0.043	0.133	−0.432	0.854
	MSI	−0.330	−0.070	0.098	0.096	−0.025	−0.785	−0.501
	PET	−0.118	0.881	0.028	0.444	−0.102	0.032	0.001
	特征值	0.270	0.061	0.012	0.004	0.002	0.001	0.000
	特征值贡献率/%	77.08	17.44	3.44	1.16	0.61	0.22	0.05
2016	GDVI	0.788	0.076	−0.369	0.184	−0.338	0.266	−0.132
	Wet	0.200	0.057	0.758	−0.036	−0.516	−0.282	−0.187
	LST	−0.199	0.364	−0.277	−0.746	−0.435	0.070	0.010
	NDBSI	−0.328	−0.199	−0.439	0.354	−0.434	−0.516	−0.283
	DI	−0.288	−0.027	0.104	0.072	−0.006	0.574	−0.756
	MSI	−0.308	−0.099	0.093	0.335	−0.484	0.494	0.544
	PET	−0.114	0.899	0.012	0.406	0.087	−0.075	−0.006
	特征值	0.205	0.059	0.010	0.004	0.002	0.001	0.000
	特征值贡献率/%	73.21	21.12	3.41	1.27	0.63	0.25	0.11

表2（续）

年份	指标	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6	PC7
2021	GDVI	0.770	−0.112	0.475	0.040	0.390	0.085	0.090
	Wet	0.221	−0.062	−0.725	0.184	0.502	−0.366	−0.052
	LST	−0.228	−0.289	0.219	0.902	0.017	−0.048	0.006
	NDBSI	−0.365	0.171	0.446	−0.188	0.407	−0.658	−0.073
	DI	−0.262	0.062	−0.048	−0.034	0.344	0.257	0.860
	MSI	−0.286	0.086	0.017	−0.025	0.555	0.598	−0.494
	PET	−0.148	−0.927	0.003	−0.337	0.063	−0.019	−0.012
	特征值	0.211	0.054	0.008	0.003	0.002	0.000	0.000
	特征值贡献率/%	75.97	19.58	2.71	0.92	0.66	0.12	0.04

注：GDVI为概括差值植被指数；Wet为湿度分量；LST为地表温度；NDBSI为归一化建筑和裸土指数；DI为沙漠化指数；MSI为土壤盐渍化指数；PET为潜在蒸散发；PC1、PC2、PC3、PC4、PC5、PC6、PC7分别为主成分分析后得到的第一、第二、第三、第四、第五、第六、第七主成分。



注：MRSEI为改进型遥感生态指数。下同。

图2　MRSEI均值变化趋势

Fig. 2　Changing trends for mean value of MRSEI

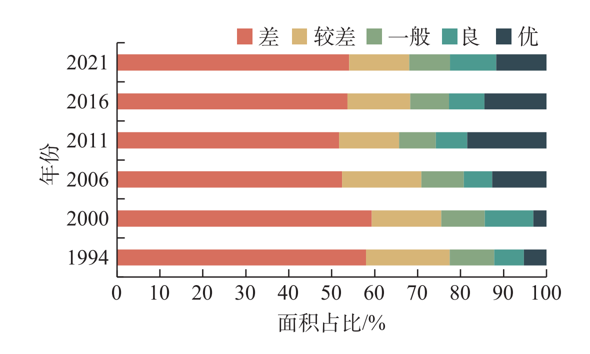


图3　不同生态环境质量等级面积占比

Fig. 3　Area ratio statistics of ecological environment quality levels

和“良”等级。研究区的整体生态环境质量呈现为“西部相对较差、东部相对较好”。

3.3　生态环境质量动态变化

在MRSEI分级的基础上，对库尔勒地区各相邻年份和始末年份的MRSEI影像进行差值计算，统计生态环境质量变化空间分布，结果表明，1994—2021年60.41%的面积上生态环境质量基本不变，主要发生在丘陵西部和台地。生态环境质量退化和改善的面积占比分别约为：16.47%、23.12%，退化主要发生在平原北部、部分中起伏山地和小起伏山地，改善主要发生在平原和丘陵的东部(图5)。

表3　库尔勒地区不同生态环境质量等级面积统计

Tab. 3　Area statistics of ecological environment quality levels in Korla region　/km²

MRSEI等级	1994年	2000年	2006年	2011年	2016年	2021年
差[0.0, 0.2)	4276.11	4373.37	3862.09	3811.24	3954.11	3983.68
较差[0.2, 0.4)	1437.78	1191.07	1361.89	1031.88	1078.67	1031.23
一般[0.4, 0.6)	759.67	747.74	728.89	631.70	668.02	699.64
良[0.6, 0.8)	510.54	834.52	488.17	535.29	604.01	796.57
优[0.8, 1.0]	389.43	226.83	932.49	1363.42	1068.72	862.41

注：MRSEI为改进型遥感生态指数。

分阶段来看，1994—2000年生态环境质量改善的面积占比9.31%，主要分布在平原东部边缘地带，生态环境质量等级的变化路径主要为“差→较差”和“一般→良”；退化的面积占比11.47%，主要分布在平原、小起伏和中起伏山地，变化路径主要为“较差→差”。2000—2006年生态环境质量改善的面积占比22.88%，主要分布在平原和丘陵东部，生态环境质量等级的变化路径主要为“差→较差”和“良→优”；退化的面积占比8.78%，主要分布在中起伏山地和小起伏山地北部，变化路径主要为“一般→较差”和“良→一般”。2006—2011年生态环境质量改善的面积占比14.89%，主要分布在平原、丘陵东部以及中起伏山地和小起伏山地北部，生态环境质量等级的变化路径主要为“良→优”“较差→一般”和“一般→良”；退化的面积占比7.22%，在平原北部和南部零星分布，变化路径主要为“较差→差”。2011—2016年生态环境质量改善的面积占比8.40%，主要

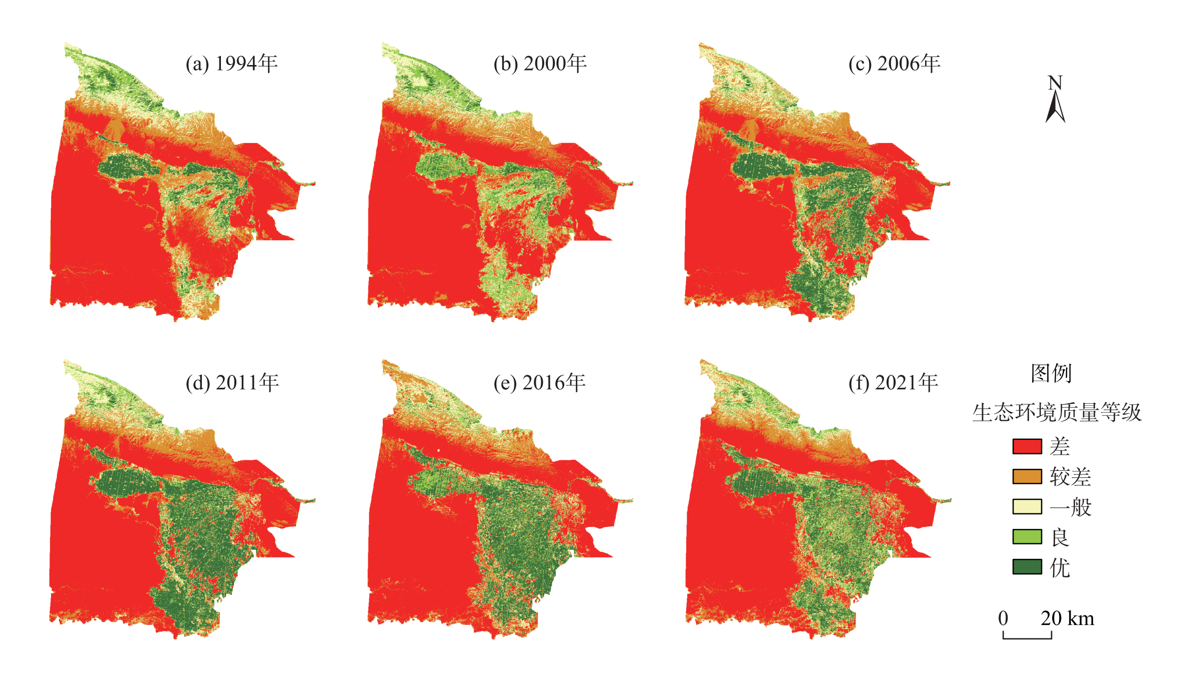


图4 库尔勒地区生态环境质量状况

Fig. 4 Ecological environment quality status of Korla region

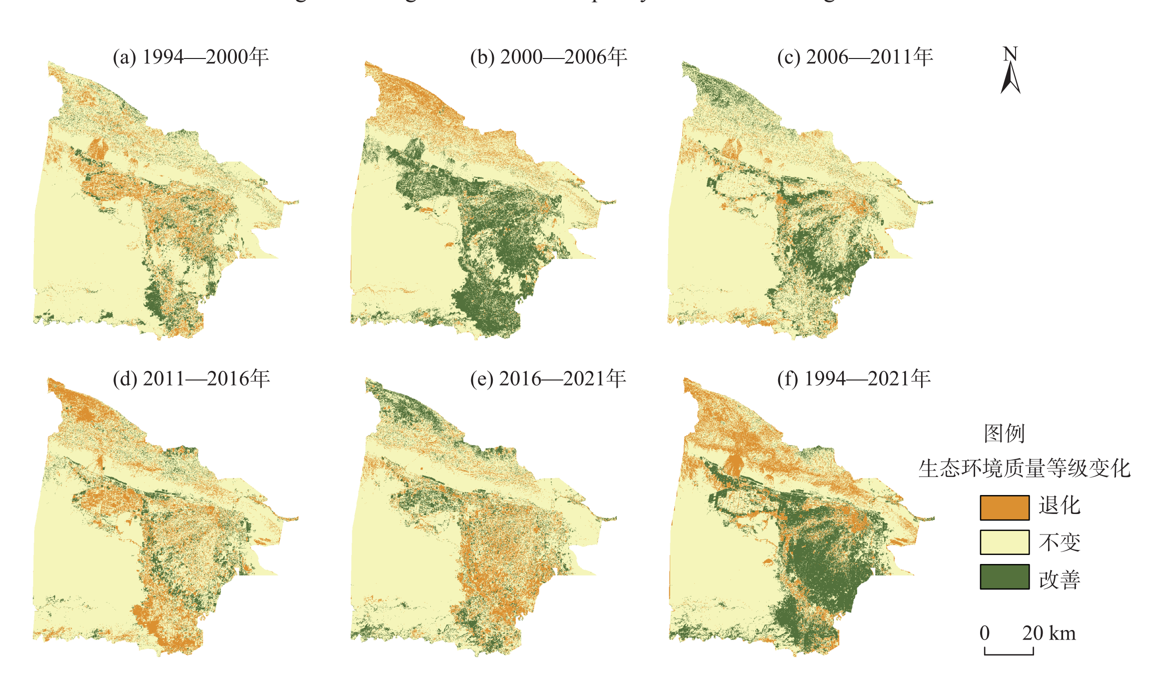


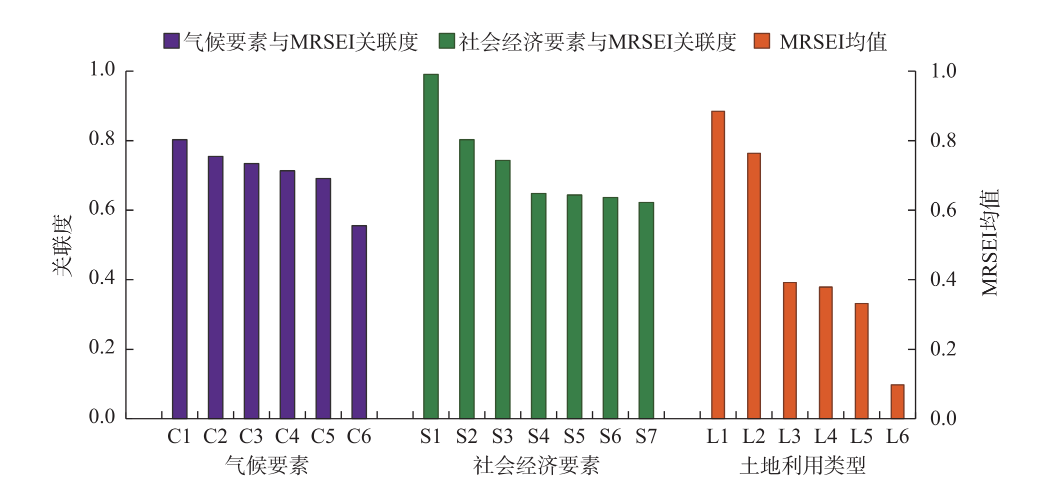
图5 库尔勒地区生态环境质量变化状况

Fig. 5 Ecological environment quality changes in Korla region

分布在平原北部和丘陵东部，生态环境质量等级的变化路径主要为"差→较差"；退化的面积占比17.54%，在平原以及中起伏山地和小起伏山地北部呈点、片状分布，变化路径主要为"较差→差"和"优→良"。2016—2021年生态环境质量改善的面积占比11.95%，主要分布在中起伏山地和小起伏山地北部以及平原北部、南部，生态环境质量等级的变化路径主要为"差→较差"和"较差→一般"；退化的面积占比14.04%，主要分布在平原和丘陵东部，变化路径主要为"优→良"和"较差→差"。

3.4 生态环境质量成因分析

本文以1994—2021年的MRSEI为参考序列，对应年份的气候要素和社会经济要素为评价序列，分别进行灰色关联度分析(图6)。



注：C1为蒸发量(mm)；C2为日照时数(h)；C3为年均气温(℃)；C4为相对湿度(%)；C5为10 m风速(m·s^{-1})；C6为降水量(mm)；S1为年末总人口(10^4人)；S2为粮食总产量(10^3 kg)；S3为人均GDP(元·人$^{-1}$)；S4为城区建设用地面积(km^2)；S5为第一产业生产总值(10^8元)；S6为第三产业生产总值(10^8元)；S7为第二产业生产总值(10^8元)；L1为林地；L2为耕地；L3为草地；L4为冰川和永久性积雪；L5为水域；L6为未利用地。

图6　关联度分析结果和各土地利用类型MRSEI均值

Fig. 6　Results of correlation degree analysis and the average MRSEI of land use types

蒸发量、日照时数、年均气温、相对湿度、风速、降水量与MRSEI关联度平均值为0.709。其中蒸发量与MRSEI的关联度最大，为0.803。库尔勒地区年蒸发量约2772.8 mm[13]，高蒸发量加剧水资源的流失，影响植被的水分供应，对生态环境质量产生不利影响。

年末总人口、粮食总产量、人均GDP、城区建设用地面积，以及第一、二、三产业生产总值与MRSEI的关联度均大于0.6。其中年末总人口与MRSEI关联度最大，为0.991。库尔勒地区早期人口过少，劳动力不足，生态环境质量较差，随着人口逐步增加，荒地开垦和植树造林扩大了植被覆盖面积，生态环境改善。农业和以生态旅游为主的第三产业的不断发展，对生态环境质量改善发挥积极作用。

生态环境质量和土地利用类型密切相关[32]。统计不同土地利用类型的MRSEI均值，结果(图6)表明，耕地和林地的MRSEI均值分别为0.764、0.885，生态环境质量相对较好；未利用地的MRSEI均值为0.097，生态环境质量最差。

4　结 论

(1) 1994—2021年库尔勒地区MRSEI均值的变化范围为0.253~0.346，增长速率为0.0136，生态环境质量在缓慢改善。生态环境质量等级以“差”和“较差”为主，二者面积占比达到70.96%，整体生态环境质量呈现为“西部相对较差、东部相对较好”。

(2) 近27 a来，60.41%的面积上生态环境质量基本不变，主要分布在丘陵西部和台地；16.47%的面积上生态环境质量退化，主要分布在平原北部、部分中起伏山地和小起伏山地；23.12%的面积上生态环境质量改善，主要分布在平原和丘陵的东部。

(3) 气候、社会经济与库尔勒地区生态环境质量关系密切，其中蒸发量对生态环境质量的影响高于其他气候要素，年末总人口是影响该地区生态环境质量的第一社会经济要素。

参考文献(References)

[1] 杨宇, 李小云, 董雯, 等. 中国人地关系综合评价的理论模型与实证[J]. 地理学报, 2019, 74(6): 1063−1078. [Yang Yu, Li Xiaoyun, Dong Wen, et al. Comprehensive evaluation on China's man-land relationship: Theoretical model and empirical study[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(6): 1063−1078.]

[2] 李桂花, 杜颖. “绿水青山就是金山银山”生态文明理念探析[J]. 新疆师范大学学报(哲学社会科学版), 2019, 40(4): 43−51. [Li Guihua, Du Ying. On the conviction that “lucid waters and lush mountains are invaluable assets”[J]. Journal of Xinjiang Normal University (Philosophy and Social Sciences Edition), 2019, 40(4): 43−51.]

[3] 刘纪远, 邵全琴, 樊江文, 等. 中国西部地区生态保护建设路径的探讨[J]. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(10): 38−43. [Liu Jiyuan, Shao Quanqin, Fan Jiangwen, et al. Exploration on the path of ecological protection and construction in western China[J].

China Population, Resources and Environment, 2013, 23(10): 38-43.]

[4] 张朝辉, 于师琪. 基于土地利用情景模拟的和田地区生态系统服务价值时空特征与交互驱动研究[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(4): 780-793. [Zhang Zhaohui, Yu Shiqi. Spatio-temporal characteristics and interaction drivers of ecosystem service value in Hotan region based on land-use scenario simulation[J]. Journal of Agriculture Resources and Environment, 2024, 41(4): 780-793.]

[5] 周寅桥, 李雄. 基于水体型生态指数的无锡市城区生态质量时空变化分析[J]. 生态学报, 2024, 44(4): 1476-1490. [Zhou Yinqiao, Li Xiong. Spatio-temporal changes of ecological quality in Wuxi urban area based on water-beneficial ecological index[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(4): 1476-1490.]

[6] Jing Y Q, Zhang F, He Y F, et al. Assessment of spatial and temporal variation of ecological environment quality in Ebinur Lake Wetland National Nature Reserve, Xinjiang, China[J]. Ecological Indicators, 2020, 110(1): 105874, doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105874.

[7] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7853-7862. [Xu Hanqiu. A remote sensing urban ecological index and its application[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7853-7862.]

[8] Dong C Y, Qiao R R, Yang Z C, et al. Eco-environmental quality assessment of the artificial oasis of Ningxia section of the Yellow River with the MRSEI approach[J]. Frontiers in Environmental Science, 2023, 10: 1071631, doi: 10.3389/fenvs.2022.1071631.

[9] 李倩琳, 沙占江. 气候变暖背景下柴达木盆地生态环境质量遥感监测[J]. 生态科学, 2022, 41(6): 92-99. [Li Qianlin, Sha Zhanjiang. Remote sensing monitoring of ecological environment quality in Qaidam Basin under the background of climate warming[J]. Ecological Science, 2022, 41(6): 92-99.]

[10] 谭新. 库尔勒城市空间形态演变机制分析与扩展模拟[D]. 成都: 西南交通大学, 2020. [Tan Xin. Mechanism analysis and expansion simulation of urban spatial from evolution in Korla[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.]

[11] 穆佳薇, 乔保荣, 余国新. 新疆塔里木河流域县域农业低碳生产率时空格局及影响效应研究[J]. 干旱区地理, 2023, 46(6): 968-981. [Mu Jiawei, Qiao Baorong, Yu Guoxin. Spatial and temporal patterns of agricultural low-carbon productivity and its influence effects in the counties of Tarim River Basin, Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(6): 968-981.]

[12] 蔡朝朝, 安沙舟, 蒲智, 等. 基于TM NDVI的库尔勒市域植被覆盖动态变化[J]. 草业科学, 2015, 32(7): 1069-1078. [Cai Zhaozhao, An Shazhou, Pu Zhi, et al. A study on vegetation coverage change in Korla City based on the TM NDVI[J]. Pratacultural Science, 2015, 32(7): 1069-1078.]

[13] 魏兴, 周金龙, 曾妍妍, 等. 新疆库尔勒市水资源压力评价[J]. 水电能源科学, 2021, 39(4): 44-47. [Wei Xing, Zhou Jinlong, Zeng Yanyan, et al. Evaluation of water resources pressure in Korla City of Xinjiang[J]. Water Resources and Power, 2021, 39(4): 44-47.]

[14] 宋歌, 王金朔, 何立恒, 等. 基于CLUE-S模型的西部干旱区土地利用变化情景模拟[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2013, 37(3): 135-139. [Song Ge, Wang Jinshuo, He Liheng, et al. Simulation of land use change in western arid region under different scenarios based on the CLUE-S model[J]. Journal of Nanjing Forest University (Natural Science Edition), 2013, 37(3): 135-139.]

[15] 陆忠奇, 赵竹君, 何清. 库尔勒市大气颗粒物浓度特征及来源[J]. 中国沙漠, 2022, 42(6): 74-84. [Lu Zhongqi, Zhao Zhujun, He Qing. Concentrations characteristics and sources of particulate matter in Korla, Xinjiang, China[J]. Journal of Desert Research, 2022, 42(6): 74-84.]

[16] Wu W C. The generalized difference vegetation index (GDVI) for dry land characterization[J]. Remote Sensing, 2014, 6(2): 1211-1233.

[17] 徐涵秋. 水土流失区生态变化的遥感评估[J]. 农业工程学报, 2013, 29(7): 91-97, 294. [Xu Hanqiu. Assessment of ecological change in soil loss area using remote sensing technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(7): 91-97, 294.]

[18] Baig M H A, Zhang L F, Shuai T, et al. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance[J]. Remote Sensing Letters, 2014, 5(5): 423-431.

[19] Nichol J. Remote sensing of urban heat island by day and night[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2005, 71(5): 613-621.

[20] Chander G, Markham B L, Helder D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(5): 893-903.

[21] Yang X D, Bai Y P, Che L, et al. Incorporating ecological constraints into urban growth boundaries: A case study of ecologically fragile areas in the Upper Yellow River[J]. Ecological Indicators, 2021, 124: 107436, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107436.

[22] Zhang M M, Kafy A A, Ren B, et al. Application of the optimal parameter geographic detector model in the identification of influencing factors of ecological quality in Guangzhou, China[J]. Land, 2022, 11(8): 1303, doi: 10.3390/land11081303.

[23] 曾永年, 向南平, 冯兆东, 等. Albedo-NDVI特征空间及沙漠化遥感监测指数研究[J]. 地理科学, 2006, 26(1): 75-81. [Zeng Yongnian, Xiang Nanping, Feng Zhaodong, et al. Albedo-NDVI space and remote sensing synthesis index models for desertification moni-

toring[J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(1): 75-81.]

[24] 邹明亮, 韩雅敏, 曾建军, 等. 基于Albedo-NDVI特征空间的玛曲县荒漠化时空动态监测[J]. 冰川冻土, 2019, 41(1): 45-53. [Zou Mingliang, Han Yamin, Zeng Jianjun, et al. Temporal and spatial dynamic mornitoring of desertification in Maqu County based on Albedo-NDVI features space[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(1): 45-53.]

[25] 魏伟, 俞啸, 张梦真, 等. 1995—2018年石羊河流域下游荒漠化动态变化[J]. 应用生态学报, 2021, 32(6): 2098-2106. [Wei Wei, Yu Xiao, Zhang Mengzhen, et al. Dynamics of desertification in the lower reaches of Shiyang River Basin, northwest China during 1995—2018[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(6): 2098-2106.]

[26] 代云豪, 管瑶, 张钦凯, 等. 阿拉尔垦区土壤盐渍化遥感监测及时空特征分析[J]. 干旱区地理, 2022, 45(4): 1176-1185. [Dai Yunhao, Guan Yao, Zhang Qinkai, et al. Remote sensing monitoring and temporal and spatial characteristics of soil salinization in Aral Reclamation Area[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(4): 1176-1185.]

[27] 王苗, 刘普幸, 乔雪梅, 等. 基于RSEDI的宁夏生态环境质量时空演变及其驱动力贡献率分析[J]. 生态学杂志, 2021, 40(10): 3278-3289. [Wang Miao, Liu Puxing, Qiao Xuemei, et al. Analysis of the spatiotemporal evolution of ecological environmental quality in Ningxia and its driving force contribution based on RSEDI[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(10): 3278-3289.]

[28] 石三娥, 魏伟, 杨东, 等. 基于RSEDI的石羊河流域绿洲区生态环境质量时空演变[J]. 生态学杂志, 2018, 37(4): 1152-1163. [Shi San'e, Wei Wei, Yang Dong, et al. Spatial and temporal evolution of eco-environmental quality in the oasis of Shiyang River Basin based on RSEDI[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(4): 1152-1163.]

[29] 李红阳, 陈天宇, 王圣杰, 等. 1979—2021年新疆昆仑山北坡潜在蒸散时空变化研究[J]. 干旱区地理, 2024, 47(9): 1443-1450. [Li Hongyang, Chen Tianyu, Wang Shengjie, et al. Spatial and temporal variations of potential evapotranspiration on the northern slope of the Kunlun Mountains in Xinjiang from 1979 to 2021[J]. Arid Land Geography, 2024, 47(9): 1443-1450.]

[30] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017[J]. Earth System Science Data, 2019, 11(4): 1931-1946.

[31] 冯尚荣, 陈庆涛. 主成分分析在遥感处理中的应用[J]. 世界有色金属, 2019(11): 255-256. [Feng Shangrong, Chen Qingtao. Application of principal component analysis in remote sensing processing[J]. World Nonferrous Metals, 2019(11): 255-256.]

[32] 潘婷, 王懿祥, 刘宪钊, 等. 雄安新区土地利用变化及其对生态质量的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(5): 1102-1110. [Pan Ting, Wang Yixiang, Liu Xianzhao, et al. Land use change and its impact on ecological quality in Xiong'an New Area[J]. Journal of Zhejiang A & F University, 2023, 40(5): 1102-1110.]

Ecological environment quality evaluation and driving factors of Korla region based on remote sensing

LI Shijiao[1], ZHANG Keke[1], XIE Baoni[1,2], WANG Shiwen[1,3], LI Zhiguang[1,3]

(1. School of Urban and Engineering, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 2. Hebei GEO University-Hebei International Joint Research Center for Remote Sensing of Agriculture Drought Monitoring, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 3. Hebei GEO University-Hebei Technology Innovation Center for Intelligent Development and Control of Underground Built Environment, Shijiazhuang 050031, Hebei, China)

Abstract: The ecological environment of the Korla region, Xinjiang, China is highly sensitive and fragile, requiring meticulous attention and sustained efforts for its preservation. Understanding the variations in ecological environment quality in this area is crucial, forming the foundation for effective ecological protection and restoration policies by local authorities. This study employs the innovative concept of the remote sensing ecological index, adapted specifically temperature, land surface dryness, desertification degree, salinization degree, and evapotranspiration—a refined index termed the modified remote sensing ecological index (MRSEI) is developed through principal component analysis. This refined index is applied to conduct a comprehensive evaluation and analysis of the factors influencing the ecological environment quality in the Korla region from 1994 to 2021. The results demonstrate that the MRSEI effectively reflects the ecological environment quality of the Korla region. From 1994 to 2021, the MRSEI ranged from 0.253 to 0.346, showing an overall upward trend and indicating an improvement in ecological environment quality. However, the overall ecological environment quality is primarily categorized as “poor” and “relatively poor”, covering 70.96% of the area. The overall spatial distribution reveals a pattern of “relatively poor” in the western part and “relatively good” in the eastern part. Over the 27-year period, approximately 60.41% of the area exhibited minimal change in ecological environment quality, mainly in the western hilly areas and tablelands. Around 16.47% of the area experienced ecological degradation, particularly in the northern plains and some moderately and slightly undulating mountain areas, while 23.12% of the region showed improvement, primarily in the eastern plains and hilly regions. Climate and socioeconomic factors are closely linked to the ecological environment quality in the Korla region. Among climatic factors, evaporation exerts the most significant impact, while among socioeconomic factors, the year-end total population is the primary driver influencing ecological environment quality.

Key words: remote sensing; ecological environment quality evaluation; principal component analysis; Korla region